气候变化情景下革苞菊属在中国的潜在地理分布

赵艳芬[1]， 潘伯荣[2]

（1. 山西财经大学资源环境学院，山西 太原 030006；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：革苞菊属(*Tugarinovia* Iljin)为阿拉善荒漠特有属，预测气候变化对革苞菊属潜在地理分布的影响对其保护至关重要。本研究基于革苞菊属当前在中国的34个分布点和22个环境变量，利用最大熵(MaxEnt)模型模拟当前和未来(2050s、2070s)3种共享社会经济路径下(SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5)革苞菊属在中国的分布格局变化，采用ROC曲线下方的面积AUC值检验模型预测效果，以刀切法和综合贡献率分析影响其分布的主要环境因子。结果表明：(1) MaxEnt模型模拟准确度较高(AUC=0.992)；海拔、最暖季度降水量、最冷季度降水量和年平均温度是影响革苞菊属地理分布的主导环境因子。(2) 当前革苞菊属适生区面积和高适生区面积范围均较小，适生区面积为37.08×10^4 km^2，高适生区面积为6.89×10^4 km^2，主要沿着阴山和贺兰山一带呈破碎化分布。(3) 未来3种气候情景下革苞菊属高适生区面积总体呈增加趋势，且在SSP5-8.5气候情景下增加幅度较大；其适生区质心主要向东(阿拉善左旗)迁移。

关键词：革苞菊属；气候变化；MaxEnt模型；环境变量；适生区

气候变化对物种分布格局、物种物候、种群大小及生态系统结构和功能造成严重威胁，会导致全球生物多样性面临巨大的挑战。物种也会因不适应气候变化而引起种群数量减少和迁移，尤其是濒危物种对气候变化敏感度更高[1-5]。鉴于此，在全球气候变化背景下，识别生物多样性保护优先区域进而提升自然保护地网络是促进我国自然保护地顺应气候变化的有效手段。目前，我国建立的自然保护区是基于物种当前分布情况而确定的，物种生境是一个动态变化的过程，会随着外界环境的变化而不断变化，未来气候变化情景下物种生境保护需求难以满足[6]。物种分布区作为物种濒危状况的指示特征之一，关注未来气候影响下的物种潜在分布区变化，对生物多样性保护和植物资源可持续利用具有至关重要的作用[7]。生态位模型是基于生态位理论构建，使用物种现有分布点和环境数据根据特定算法来反映不同气候情景下物种潜在分布区变化的一种数学模型[8]。在最大熵模型(MaxEnt)、生物种群生长模型(CLIMEX)、生物气候模型(BIOCLIM)、DOMAIN模型和遗传算法模型(GARP)等众多的生态位模型中，最大熵模型MaxEnt在预测精确度方面优于其他模型，已有研究运用该模型对大量物种开展潜在分布区研究[9-12]。即使在小样本、物种记录点少或数据不完整的情况下也能较好地模拟物种的适生区变化[13-15]。目前，被广泛应用于生物多样性保护、谱系地理学、生态学、入侵生物学以及全球气候变化对物种分布的影响等研究领域[16-19]。

革苞菊属(*Tugarinovia* Iljin)隶属于菊科(Asteraceae)，为阿拉善荒漠特有属，亦为蒙古高原特有属[20]。该属包含革苞菊(*T. mongolica*)和卵叶革苞菊(*T. ovatifolia*)两个种[21]。革苞菊为北阿拉善-东戈壁分布种，已被列为国家二级重点保护野生植物，同时也被列入中国高等植物受威胁物种名录中，属易危物种[22-23]；卵叶革苞菊为南阿拉善东部(桌子山-贺兰山)低山丘陵分布种。革苞菊属主要分布于达尔罕茂明安联合旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗、阿拉善左旗北部、卓子山、贺兰山等地，它对研究亚洲中部植物区系和菊科植物系统发育有重要的科

收稿日期：2022-08-27； **修订日期：**2023-03-13
基金项目：山西省基础研究计划项目(20210302124500)资助
作者简介：赵艳芬(1987-)，女，博士，讲师，主要从事干旱区生物地理学研究. E-mail: zhaoyanfenhappy@163.com
通讯作者：潘伯荣. E-mail: brpan@ms.xjb.ac.cn

学价值[21,24]。由于气候变化、人类活动和自身生殖生物学障碍等因素导致该物种分布区狭窄,种群数量日趋减少。目前对革苞菊属的研究主要集中在分类学[25]、解剖学[26-28]、胚胎学[29-31]、生物地理学[32]等领域。然而,革苞菊属在我国的适生区范围及其对气候变化的响应鲜见报道。

本研究基于革苞菊属已有野外调查数据及文献资料获取物种分布点,结合气候和地形等环境因子,运用ArcGIS和MaxEnt 3.4.1软件,模拟当前(Current)和未来(2050s、2070s)3种共享社会经济路径情景下(SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5)革苞菊属在我国的潜在分布区。分析影响革苞菊属潜在地理分布的主导环境因子,探讨未来不同气候情景下革苞菊属在中国的适生区和空间格局的变化,旨在为其野生资源保护及自然保护区建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

革苞菊属的分布数据主要来源于:(1) 2015—2016年野外实地调查及2022年对革苞菊属居群补充调查;(2) 全球生物多样性信息机构(https://www.gbif.org/);(3) 国家标本平台(http://www.nsii.org.cn/);(4) 中国数字植物标本馆(https://www.cvh.ac.cn/);(5) 已发表的相关文献。剔除重复和无法精确到县级的分布信息,最终得到34个有效分布点(图1)。其中19个地理信息数据源于野外实地调查,15个地理信息数据源于文献及网络数据平台。将34个数据整理到Excel表格中并保存为csv格式。

从世界气候数据库(http://www.worldclim.org/)中获取19个环境变量(Bio1-Bio19)和海拔数据,并使用ArcGIS软件从海拔数据中提取另两个地形因子(坡度和坡向)。所有环境变量的空间分辨率均为2.5 arc-minutes。未来气候数据运用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)模式中的BCC-CSM2-MR模型,包括共享社会经济路径中的3种排放情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5)。其中,SSP1-2.6是RCP2.6情景的更新版,代表低强迫情景;SSP2-4.5是RCP4.5情景的更新版,代表中等强迫情景;SSP5-8.5是RCP8.5情景的更新版,代表高强迫情景[33-34]。

1.2 环境变量筛选

在建模中为减少因环境变量间存在多重共线性导致MaxEnt模型的过拟合,运用R软件Hmisc程序包中的cor函数对22个环境因子进行Pearson相关性分析[35],选取相关系数$|r|<0.85$的环境变量,对于相关系数$|r|>0.85$的环境变量保留贡献率较高的一个且能够反应革苞菊属植物生长的环境因子[36],最终确定11个环境变量用于后续建模。

1.3 最大熵模型构建与运行

将革苞菊属分布点数据(csv格式)和环境变量分别导入到MaxEnt 3.4.1软件中对当前和未来(2050s和2070s)3种气候情景下的潜在分布区进行模拟运算。参数设置为:75%的革苞菊属分布数据作为训练集(training data),剩余25%的分布数据作为测试集(testing data),设置10次重复,其他参数默认不变[33]。基于刀切法(Jackknife)检验环境变量对物种潜在分布区模拟的重要性。采用接受者操作特性曲线(ROC曲线)下方的面积AUC值评估模型预测效果[14]。AUC值范围为0~1,如果AUC值在0.8~0.9之间说明预测效果良好,大于0.9说明预测效果非常好[11]。

1.4 适生等级划分及质心迁移分析

根据野外实地调查和革苞菊属在中国的分布状况将其分布区划分为高适生区(0.5~1)、中适生区(0.3~0.5)、低适生区(0.1~0.3)和非适生区(0~0.1)4个等级[37],并绘制当前和未来不同气候变化情景下革苞菊属在中国的潜在适生区预测图。将MaxEnt 3.4.1软件模拟的结果导入到ArcGIS 10.6中转换为栅格数据,asc格式文件转成栅格文件。采用SDM toolbox 2.4工具箱中的"Quick Reclassify to Binary"工具把栅格文件转为二进制文件[38],应用该工具箱中的"Distribution Changes Between Binary SDMs"工具计算革苞菊属在不同时期、不同气候情景下的适生区面积,确定不同时期适生区质心的位置和迁移方向。

2 结果与分析

2.1 MaxEnt模型精度检验

基于34个当前分布数据和筛选后的11个环境变量运用MaxEnt 3.4.1软件对革苞菊属在中国的潜在分布区进行建模和预测。重复运行10次后平均

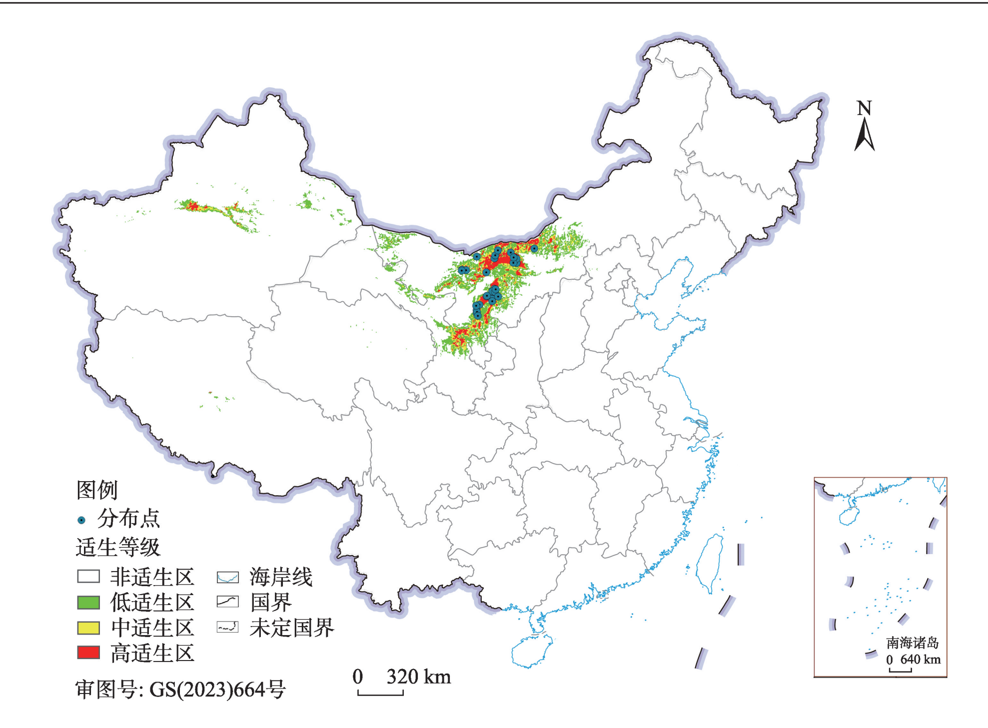


图1 当前革苞菊属在中国的分布点及其适生分布区

Fig. 1 Current distribution sites and suitable distribution areas of *Tugarinovia* in China

AUC值为0.992(图2),指标值接近1,说明MaxEnt模型预测革苞菊属植物潜在地理分布的结果准确、可靠。

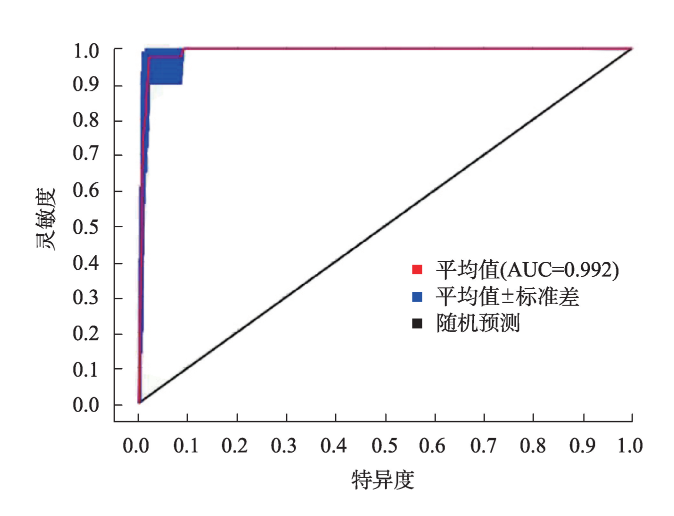


图2 MaxEnt模型的ROC检验

Fig. 2 ROC of the MaxEnt model

2.2 影响革苞菊属分布的主导环境因子

表1结果表明,贡献率排在前3位的分别是:海拔对预测革苞菊属潜在地理分布的贡献率为22.4%,最暖季度降水量(Bio18)和最冷季度降水量(Bio19)对革苞菊属潜在分布预测的贡献率分别为22.2%和20.3%(表1),以上两个与降水相关的环境因子对预测的贡献率累积为42.5%。刀切法检验结果表明,仅使用单一变量时对革苞菊属分布区影响最大的3个环境因子分别为:最暖季度降水量、海拔和年平均温度,说明这3个环境变量比其他环境变量拥有更多的有效信息(图3)。综上所述,影响革苞菊属地理分布的主导环境变量为海拔、最暖季度降水量、最冷季度降水量和年平均温度,其中海拔和降水因子对其潜在分布区影响较大。

表1 环境变量及其贡献率

Tab. 1 Environmental variables and their contribution rates

类型	环境变量	描述	贡献率/%
气候因子	Bio18	最暖季度降水量	22.2
	Bio19	最冷季度降水量	20.3
	Bio2	平均气温日较差	9.2
	Bio4	温度季节性变化	8.5
	Bio11	最冷季节平均温度	7.5
	Bio15	降水量季节性变化	1.9
	Bio3	等温性	1.5
	Bio1	年平均温度	0.2
地形因子	Ele	海拔	22.4
	Slope	坡度	4
	Aspect	坡向	2.3

2.3 当前革苞菊属在中国的适生区

革苞菊属当前在中国的适生区面积为37.08×

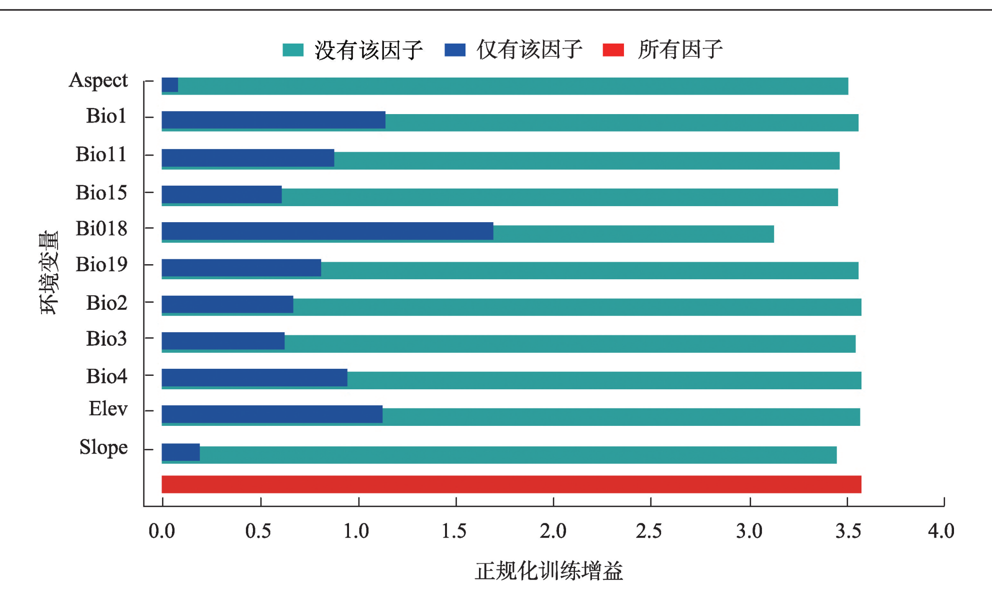


图3 利用刀切法检测环境变量对革苞菊属分布影响的重要性

Fig. 3 The significance of environmental variables on the distribution of *Tugarinovia* using Jackknife test

10^4 km^2，约占中国国土面积的3.8%(表2)。主要分布在中国的内蒙古地区，宁夏、甘肃、新疆也有少量分布(图1)。高适生区约占总适生区面积的18.6%，中适生区面积和低适生区面积均大于高适生区面积，分别占总适生区面积的20.3%和61.1%(表2)。其中高适生区面积为6.89×10^4 km^2，主要集中在阴山和贺兰山一带，分布于内蒙古巴彦淖尔市的乌拉特后旗、乌拉特中旗和乌拉特前旗；阿拉善盟的阿拉善左旗和阿拉善右旗；鄂尔多斯的鄂托克旗和乌海市；宁夏的石嘴山市、银川市和中卫市；甘肃的白银市及新疆的阿克苏市等地也有零星分布。

表2 革苞菊属不同时期在中国的潜在适生区面积

Tab. 2 Potential suitable areas of *Tugarinovia* in China in different periods /10^4 km^2

时期	总适生区	高适生区	中适生区	低适生区
当前	37.08	6.89	7.53	22.66
2050s(SSP1-2.6)	36.12	7.13	6.94	22.05
2070s(SSP1-2.6)	38.64	7.18	7.90	23.56
2050s(SSP2-4.5)	33.87	7.34	7.07	19.46
2070s(SSP2-4.5)	37.52	7.12	7.97	22.43
2050s(SSP5-8.5)	37.43	7.43	8.09	21.91
2070s(SSP5-8.5)	39.03	8.28	8.37	22.38

2.4 未来不同气候情景下革苞菊属在中国的潜在适生区变化

革苞菊属在未来2050s和2070s 3种气候情景下高适生区面积、中适生区面积和低适生区面积较当前均呈现出不同的变化趋势(表2)。SSP1-2.6情景下，2050s革苞菊属总适生区面积较当前分布面积减少2.6%，2070s总适生区面积增加4.2%。其中，高适生区面积在2050s和2070s较当前分别增加3.5%和4.2%，中适生区和低适生区面积在2050s和2070s均呈先减少后增加的趋势。SSP2-4.5情景下，2050s总适生区面积较当前分布面积减少8.6%，2070s总适生区面积增加1.2%。其中，高适生区面积在2050s和2070s较当前分别增加6.5%和3.3%，中适生区面积在2050s和2070s呈先减少后增加的趋势，低适生区面积在2050s和2070s均呈减少趋势。SSP5-8.5情景下，2050s和2070s总适生区面积较当前分布面积分别增加0.9%和5.3%。其中，高适生区面积在2050s和2070s较当前分别增加7.8%和20.2%，中适生区面积在2050s和2070s均呈增加趋势，而低适生区面积均呈减少趋势(图4)。

2.5 革苞菊属适生区质心迁移方向

由图5可知，在SSP1-2.6情景下2050s革苞菊属适生区质心较当前向西迁移，2070s适生区质心持续向西迁移。在SSP2-4.5情景下，2050s革苞菊属适生区质心较当前向东南方向迁移，2070s又向西北方向迁移，有接近当前中心点的趋势。在SSP5-8.5情景下，2050s革苞菊属适生区质心主要向东北方向迁移，2070s又向东南方向迁移，迁移至内蒙古阿拉善左旗境内。

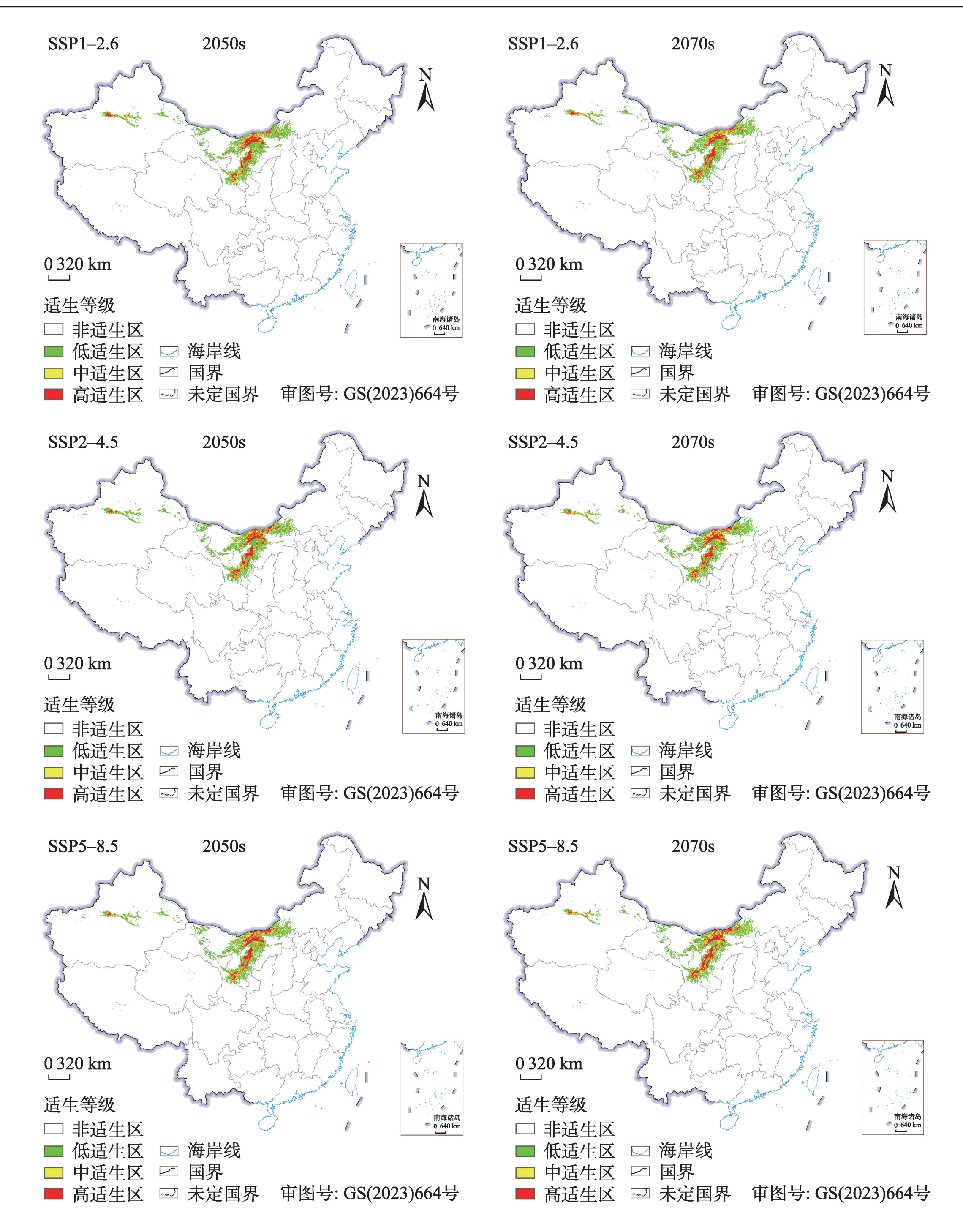


图4　不同气候情景下革苞菊属在中国的潜在分布区

Fig. 4　Potential distribution areas of *Tugarinovia* in China under different climate scenarios

3 讨 论

样本容量和物种生态特征对模型模拟准确度影响较大,通常生态幅窄、环境特化的物种比生态幅宽、对环境忍耐度大的物种运用生态位模型模拟准确度更高[39-41]。本文中MaxEnt模型的预测精度达到了0.992,表明该模型预测的结果准确可靠。预测结果与革苞菊属当前在中国的实际分布基本吻合。在我国西北干旱区,温度和降水是决定物种潜在地理分布和生长的重要环境因子[36]。段义忠等[42-43]认为,水分和温度是影响沙冬青属和半日花分布的主导环境变量;苏志豪等[44]认为,温度和降水相关的环境因子对沙生柽柳潜在地理分布格局影响较大;鲁客等[36] 认为,温度和降水是影响黑沙

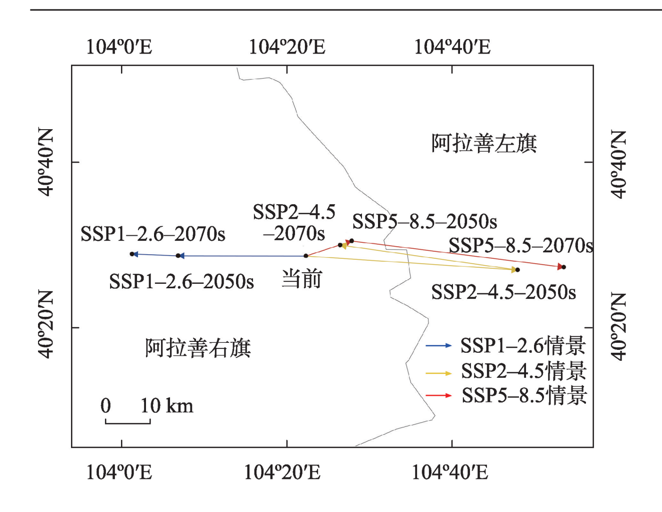


图5 不同气候情景下革苞菊属在中国的迁移路径

Fig. 5 Migration paths of *Tugarinovia* in China under different climate scenarios

蒿潜在地理分布的主要气候因子。本研究中影响革苞菊属潜在地理分布的环境因子为：最暖季度降水量、海拔、最冷季度降水量和年平均温度。降水相关因子累积贡献率为42.5%，是影响革苞菊属地理分布的重要环境因子。这与革苞菊属的生物学特性有关，革苞菊属生长对水分有一定的需求，在降水量偏少的情况下革苞菊属种群数量会随之减少。此外，海拔的贡献率为22.4%，也是影响革苞菊属潜在地理分布的关键环境因子。革苞菊属生长在海拔1000~1500 m干旱的石质残丘或砾石质坡地上，结合野外调查发现，革苞菊属的种群在1200 m左右居多，这也验证了刀切法的检验结果。

气候变暖会引起物种适宜分布区范围缩小，种群间基因流中断和遗传多样性降低等；也有研究发现，温度升高会使物种遗传多样性增加，使得物种分布区扩大[45-46]。分子证据显示革苞菊属居群也存在较高水平的遗传多样性，种群间遗传分化程度较高[32]。革苞菊属在未来3种气候情景下高适生区面积将增加3.3%~20.2%，且在SSP5-8.5的2050s和2070s时期高适生区面积增幅最大。这可能与未来中国西北地区气温升高、年降水量逐渐增加相关[47]，使得革苞菊属潜在分布区由不适宜生境向适宜生境转变。本文预测的革苞菊属适生区和高适生区面积虽有所增加，但整体分布范围较小且呈破碎化分布。在野外实地调查中发现，卵叶革苞菊仅分布在我国卓子山-贺兰山低山丘陵地带，种群和数量稀少，尤其在乌海(矿区开发地中)分布区面临极大的破坏。目前革苞菊属还没有设立自然保护区，因此建议对革苞菊属高适生区建立自然保护区，以保护原有生境和维持种群的稳定，实现就地保护该属物种。同时，尽快从受人类活动影响较大的种群中引种收集种质资源，采取人工繁殖技术扩大其分布区范围，应对气候变化对革苞菊属自然分布区的影响。

已有研究表明，全球气候变化还会导致大量植物向高纬度和高海拔地区迁移[1,36,41]，但不同物种对环境适应不同，导致变化趋势有所差异[48]。本研究预测的革苞菊属在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下，适生区的质心向低海拔地区迁移；在SSP5-8.5排放情景下，2070s革苞菊属适生区质心向低纬度迁移，且向阿拉善左旗接近。气候变化将导致革苞菊属种群适宜生境总体向低海拔和低纬度迁移，也证实了物种迁移能力也是物种适应未来气候变化的影响因素。未来气候变化必定对革苞菊属植物的地理分布产生影响，本研究仅考虑环境变量和地形因子进行建模，物种实际分布还与诸多因素相关，如土壤类型、人类干扰活动以及生物因子(种间竞争力、生物相互作用)等，在以后的研究中应该将上述因素综合考虑以提高模型对革苞菊属适生区预测的精度和准确性。

4 结 论

MaxEnt模型适用于模拟革苞菊属在我国的潜在分布范围。最暖季度降水量、海拔、最冷季度降水量和年平均温度是影响革苞菊属地理分布的重要环境变量，其中海拔和降水相关的因子对革苞菊属分布格局影响较大。当前革苞菊属高适生区范围与实际分布范围基本吻合，主要分布在内蒙古巴彦淖尔市的乌拉特后旗、乌拉特中旗和乌拉特前旗；阿拉善盟的阿拉善左旗和阿拉善右旗；鄂尔多斯的鄂托克旗和乌海市；宁夏的石嘴山市、银川市和中卫市。高适生区面积相比当前均有所增加，可以适应未来气候变化，但总体分布范围和高适生区范围均较小，呈破碎化分布，建议对革苞菊属高适生区采取就地保护和迁地保护等措施扩大种群分布范围。

参考文献(References)：

[1] 方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应[J]. 科学通报, 2018, 63(2): 136-140. [Fang Jingyun, Zhu Jiangling, Shi Yue.

The responses of ecosystems to global warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(2): 136−140.]

[2] 王文婷, 杨婷婷, 金磊, 等. 未来气候变化下两种红景天植物的脆弱性[J]. 生物多样性, 2021, 29(12): 1620−1628. [Wang Wenting, Yang Tingting, Jin Lei, et al. Vulnerability of two *Rhodiola* species under climate change in the future[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(12): 1620−1628.]

[3] 贺晓慧, 司建华, 赵春彦, 等. 西藏沙棘(*Hippophae thibetana*)潜在地理分布及其对未来气候变化的响应模拟[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 101−109. [He Xiaohui, Si Jianhua, Zhao Chunyan, et al. Potential distribution of *Hippophae thibetana* and its predicted responses to climate change[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 101−109.]

[4] 吴建国, 吕佳佳, 周巧富. 我国珍稀濒危物种适应气候变化的对策探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3): 566−570. [Wu Jianguo, Lv Jiajia, Zhou Qiaofu. Strategies of adaptation to climate change for rare or endangered species in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(3): 566−570.]

[5] Qu H, Wang C J, Zhang Z X. Planning priority conservation areas under climate change for six plant species with extremely small populations in China[J]. Nature Conservation, 2018, 25: 89−106.

[6] 冉巧, 卫海燕, 赵泽芳, 等. 气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2481−2493. [Ran Qiao, Wei Haiyan, Zhao Zefang, et al. Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2481−2493.]

[7] 刘文胜, 游简舲, 曾文斌, 等. 气候变化下青藏苔草地理分布的预测[J]. 中国草地学报, 2018, 40(5): 43−49. [Liu Wensheng, You Jianling, Zeng Wenbin, et al. Prediction of the geographical distribution of *Carex moorcroftii* under global climate change based on Maxent model[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(5): 43−49.]

[8] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40(1): 677−697.

[9] 张亮, 魏彦强, 王金牛, 等. 气候变化情景下黑果枸杞的潜在地理分布[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 969−978. [Zhang Liang, Wei Yanqiang, Wang Jinniu, et al. The potential geographical distribution of *Lycium ruthenicum* Murr. under different climate change scenarios[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(4): 969−978.]

[10] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological modelling, 2006, 190(3−4): 231−259.

[11] Yang Z B, Bai Y, Alatalo J M, et al. Spatio-temporal variation in potential habitats for rare and endangered plants and habitat conservation based on the maximum entropy model[J]. Science of the Total Environment, 2021, 784: 147080.

[12] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状[J]. 植物生态学报, 2019, 43(4): 273−283. [Liu Xiaotong, Yuan Quan, Ni Jian. Research advances in modelling plant species distribution in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(4): 273−283.]

[13] Yi Y J, Cheng X, Yang Z F, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant(*Homonoia riparia* Lour.) in Yunnan, China[J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 260−269.

[14] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2): 161−175.

[15] 胡菀, 张志勇, 陈陆丹, 等. 末次盛冰期以来观光木的潜在地理分布变迁[J]. 植物生态学报, 2020, 44(1): 44−45. [Hu Wan, Zhang Zhiyong, Chen Ludan, et al. Changes in potential geographical distribution of *Tsoongiodendron odorum* since the last glacial maximum[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(1): 44−45.]

[16] Mainali K P, Warren D L, Dhileepan K, et al. Projecting future expansion of invasive species: Comparing and improving methodologies for species distribution modeling[J]. Global Change Biology, 2016, 21(12): 4464−4480.

[17] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1189−1196. [Zhu Gengping, Qiao Huijie. Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1189−1196.]

[18] Jing W, Qi G J, Ma J, et al. Predicting the potential geographic distribution of *Bactrocera bryoniae* and *Bactrocera neohumeralis*(Diptera: Tephritidae) in China using MaxEnt ecological niche modeling[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(8): 2072−2082.

[19] 欧阳泽怡, 欧阳硕龙, 吴际友, 等. 最大熵模型在植物适生区预测应用中的研究进展[J]. 湖南林业科技, 2022, 49(1): 83−88. [Ouyang Zeyi, Ouyang Shuolong, Wu Jiyou, et al. Progress of the application of prediction of potential suitable distribution of plants based on Maxent[J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2022, 49(1): 83−88.]

[20] 赵一之. 蒙古高原植物的特有属及其基本特征[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1997, 28(4): 547−552. [Zhao Yizhi. Endemic genera and their basic characteristics of the Mongolian planteau plants[J]. Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition), 1997, 28(4): 547−552.]

[21] 赵一之, 赵利清, 曹瑞. 内蒙古植物志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2019: 267−269. [Zhao Yizhi, Zhao Liqing, Cao Rui. Flora Intramongolica[M]. Hohhot: Inner Mongolia People's Press, 2019: 267−269.]

[22] 国家林业和草原局. 国家林业和草原局农业农村部公告(2021年第15号)(国家重点保护野生植物名录). http://www.forestry.gov.cn, 2021. [National Forestry and Grassland Administration. Announcement of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of

the National Forestry and Grassland Administration(2021 No. 15) (List of National key protected wild plants). http://www.forestry.gov.cn, 2021.]

[23] 覃海宁, 杨永, 董仕勇, 等. 中国高等植物受威胁物种名录[J]. 生物多样性, 2017, 25(7): 696-744. [Qin Haining, Yang Yong, Dong Shiyong, et al. Threatened species list of China higher plants [J]. Biodiversity Science, 2017, 25(7): 696-744.]

[24] 赵一之. 内蒙古珍稀濒危植物图谱[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 70-71. [Zhao Yizhi. Rare and Endangered Plants in Inner Mongolia[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992: 70-71.]

[25] 赵一之. 革苞菊属的分类及其地理分布[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 873-875. [Zhao Yizhi. The classification and its geographycal distribution of *Tugarinovia*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(5): 873-875.]

[26] 马虹, 肖爱军, 曹瑞. 革苞菊花蜜腺的发育解剖学研究[J]. 云南植物研究, 2002, 24(5): 638-644. [Ma Hong, Xiao Aijun, Cao Rui. Developmental and anatomic studies on the floral nectaries in *Tugarinovia mongolica*[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2002, 24(5): 638-644.]

[27] 马虹, 孙雅源, 曹瑞. 濒危植物革苞菊地下器官解剖学研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 418-421. [Ma Hong, Song Yayuan, Cao Rui. Anatomical study on rhizome of endangered plant *Tugarinovia mongolica*[J]. Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition), 2011, 42(4): 418-421.]

[28] 马虹, 郑亚明, 曹瑞, 等. 濒危植物革苞菊营养器官的解剖学研究[J]. 植物研究, 2009, 29(2): 141-146. [Ma Hong, Zheng Yaming, Cao Rui, et al. The anatomical study on vegetative organs of endangered plant *Tugarinovia mongolica*[J]. Bulletin of Botanical Research, 2009, 29(2): 141-146.]

[29] 马虹, 王迎春, 曹瑞, 等. 革苞菊胚胎学研究Ⅰ. 大、小孢子发生和雌、雄配子体发育[J]. 西北植物学报, 2000, 20(3): 461-466. [Ma Hong, Wang Yingchun, Cao Rui, et al. The embryological study of *Tugarinovia mongolica* Ⅰ. Megasporogenesis microsporogenesis and development of gametophytes[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(3): 461-466.]

[30] 马虹, 曹瑞, 马晓娟. 革苞菊胚珠发育过程中多糖动态的研究[J]. 内蒙古大学学报(自然版), 2001, 32(4): 442-444. [Ma Hong, Cao Rui, Ma Xiaojuan. A study on the dynamics of polysaccharose during ovular development in *Tugarinovia mongolica*[J]. Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition), 2001, 32(4): 442-444.]

[31] 马虹, 曹瑞. 革苞菊胚胎学研究Ⅱ-双受精过程及胚和胚乳发育[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2002, 33(2): 194-196. [Ma Hong, Cao Rui. The embryological study of *Tugarinovia mongolica* Ⅱ the fertilization and the development of embryo and endosperm[J]. Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition), 2002, 33(2): 194-196.]

[32] Zhao Y F, Pan B R, Zhang M L. Phylogeography and conservation genetics of the endangered *Tugarinovia mongolica*(Asteraceae) from Inner Mongolia, Northwest China[J]. Plos One, 2019, 14: e0211696.

[33] 夏昕, 李媛, 杨道德, 等. 气候变化下寒露林蛙在中国的潜在地理分布[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4307-4314. [Xia Xin, Li Yuan, Yang Daode, et al. Potential geographical distribution of *Rana hanluica* in China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4307-4314.]

[34] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(scenarioMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5) : 519-525. [Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project(scenarioMIP) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519-525.]

[35] 张林, 张云玲, 马松梅, 等. 准噶尔盆地大赖草分布格局及关键因子分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 863-871. [Zhang Lin, Zhang Yunling, Ma Songmei, et al. Distribution pattern and driving mechanisms of the sand plant *Leymus racemosus* in the Junggar Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 863-871.]

[36] 鲁客, 贺一鸣, 毛伟, 等. 未来气候变化下黑沙蒿在中国的潜在地理分布及变迁[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3758-3766. [Lu Ke, He Yiming, Mao Wei, et al. Potential geographical distribution and changes of *Artemisia ordosica* in China under future climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3758-3766.]

[37] 张殷波, 高晨虹, 秦浩. 山西翅果油树的适生区预测及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1156-1162. [Zhang Yinbo, Gao Chenhong, Qin Hao. Prediction of the suitable distribution and responses to climate change of *Elaeagnus mollis* in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1156-1162.]

[38] Brown J L. SDM toolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(7): 694-700.

[39] 邵慧, 田佳倩, 郭柯, 等. 样本容量和物种特征对BIOCLIM模型模拟物种分布准确度的影响——以12个中国特有落叶栎树种为例[J]. 植物生态学报, 2009, 33(5): 870-877. [Shao Hui, Tian Jiaqian, Guo Ke, et al. Effects of sample size and species traits on performance of bioclim in predicting geographical distuibution of tree species: A case study with 12 deciduous Quercus species indigenous to China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(5): 870-877.]

[40] Stockwell D R B, Peterson A T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models[J]. Ecological modelling, 2002, 148(1): 1-13.

[41] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, et al. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1326-1334.

[42] 段义忠, 王驰, 王海涛, 等. 不同气候条件下沙冬青属植物在我国的潜在分布——基于生态位模型预测[J]. 生态学报, 2020,

40(21): 7668-7680. [Duan Yizong, Wang Chi, Wang Haitao, et al. Predicting the potential distribution of *Ammopiptanthus* species in China under different climates using ecological niche models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7668-7680.]

[43] 段义忠, 王海涛, 王驰, 等. 气候变化下濒危植物半日花在中国的潜在分布[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(2): 55-68. [Duan Yizhong, Wang Haitao, Wang Chi, et al. Potential distribution of endangered plant *Helianthemum songaricum* in China under climate change[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2020, 29(2): 55-68.]

[44] 苏志豪, 潘伯荣, 卓立, 等. 未来气候变化对特有物种沙生柽柳分布格局的影响及其保护启示[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 150-155. [Su Zhihao, Pan Borong, Zhuo Li, et al. Impact of future climate change on distribution pattern of *Tamarix taklamakanensis* and its conservation revelation[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 150-155.]

[45] Bálint M, Domisch S, Engelhardt C H M, et al. Cryptic biodiversity loss linked to global climate change[J]. Nature Climate Change, 2011, 1(6): 313-318.

[46] 何远政, 黄文达, 赵昕, 等. 气候变化对植物多样性的影响研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 59-66. [He Zhengyuan, Huang Wenda, Zhao Xin, et al. Review on the impact of climate change on plant diversity[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 59-66.]

[47] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Zhang Feimin, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 980-989.]

[48] 翟新宇, 申宇芳, 朱圣华, 等. 未来气候变化对孑遗植物鹅掌楸地理分布的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(2): 151-161. [Zhai Xinyu, Shen Yufang, Zhu Shenghua, et al. Potential impacts of climate change in future on the geographical distributions of relic *Liriodendron chinense*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2021, 29(2): 151-161.]

Potential geographical distributions of *Tugarinovia* in China under climate change scenarios

ZHAO Yanfen[1], PAN Borong[2]

(1. College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: *Tugarinovia* is a genus that is endemic to the Alashan Desert in China. It is crucial for the conservation of *Tugarinovia* to predict the impact of climate change on its potential geographical distribution. This study was based on 34 sites of distribution of *Tugarinovia* in China and 22 environmental variables. The current and future (2050s and 2070s) changes in the pattern of distribution of *Tugarinovia* under three shared socio-economic paths (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5) in China were simulated using a maximum entropy (MaxEnt) model. The ability of model to predict these changes was verified by the area under curve (AUC) value under the receiver operating characteristic (ROC) curve, and the primary environmental factors that affect its distribution were analyzed using the Jackknife method and comprehensive contribution rate. The results showed the following: (1) The MaxEnt model has high simulation accuracy (AUC=0.992), and altitude, the warmest quarterly precipitation, the coldest quarterly precipitation, and annual average temperature are the dominant environmental factors that affect the geographical distribution of the *Tugarinovia*. (2) Currently, the suitable and highly suitable areas for *Tugarinovia* are both limited, with a suitable area of 37.08×10^4 km^2 and a highly suitable area of 6.89×10^4 km^2, which are primarily distributed along the Yinshan and Helan Mountains in a fragmented manner. (3) The future three climate scenarios suggest that the highly suitable areas of *Tugarinovia* will overall increase and display a significant increase under the SSP5-8.5 climate scenario. The centroid of its suitable area mainly migrates to the east (Alxa Left Banner).

Keywords: *Tugarinovia*; climate change; MaxEnt model; environmental variables; suitable area